

文章编号: 0451-0712(2005)12-0022-05

中图分类号: U447

文献标识码: B

大跨桥梁结构健康监测及安全评价系统研究与应用进展

张宇峰¹, 徐宏¹, 倪一清²

(1. 江苏省交通科学研究院 南京市 210017; 2. 香港理工大学 中国香港)

摘要: 大型桥梁结构健康监测及安全评估是近年来国内外的研究热点, 本文结合江苏省交通科学研究院近年来在健康监测及安全评价系统研究与设计中所取得的成果, 重点阐述了健康监测系统的目标、意义、主要内容、设计准则及在国内外的应用情况。

关键词: 桥梁; 健康监测; 损伤识别; 安全评价

桥梁在建造和使用过程中, 由于受到环境、有害物质的侵蚀, 车辆、风、地震、疲劳、人为因素等作用, 以及材料自身性能的不断退化, 导致结构各部分在远没有达到设计年限前就产生不同程度的损伤和劣化。这些损伤如果不能及时得到检测和维修, 轻则影响行车安全和缩短桥梁使用寿命, 重则导致桥梁突然破坏和倒塌。因此, 为保证桥梁结构的安全性、适用性和耐久性, 加强对桥梁健康状况的监测和评估, 从而实施合理的养护管理工作极为重要。

传统上, 桥梁结构健康状况评估是通过人工目测检查或借助于便携式仪器测量得到的信息进行的。但人工检查方法在实际应用中有很大的局限性, 美国联邦公路委员会的最近调查表明, 由人工目测检查做出的评估结果有 56% 是不恰当的。传统检测方式的不足之处主要表现在: (1) 需要大量人力、物力和财力并有诸多检查盲点; (2) 主观性强, 难于量化; (3) 缺少整体性; (4) 影响正常交通运行; (5) 周期长, 实时性差。

收稿日期: 2005-06-02

A Study on Shear Lag Effect for Continuously Curved RC Box Girders

HU Zhao-tong¹, LIU Yun-xin^{1,2}, CAI Jian-ming³

(1. Institute of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. China Zhongtie Major Bridge Reconnaissance and Design Institute, Wuhan 430050, China; 3. Quzhou Communications Design Co. Ltd., Quzhou 324002, China)

Abstract: The finite element method is applied to analyze the shear lag effect of continuously curved RC box girders. The affecting factors include: curvature radius, ratio of height to width, distance of webs, bearing offsetting of single-pedestal pier, numbers of cross boards and forms of beam section. Based on the load testing in a real bridge, the deflection, strain, stress and shear lag coefficients are calculated. The rules of shear lag coefficients changing with the affecting factor are summarized. It is proved that curvature radius is the most important affecting factor and the suggestions on diminishing the shear lag effect in design are made.

Key words: continuously curved box girder; shear lag effect; curvature radius

由于传统检查方法的上述诸多缺点和限制,它们无法直接有效地应用于大型桥梁的健康状况检查,因此有必要建立和发展一个针对大跨桥梁的结构健康监测与安全评估系统,用以监测和评估大桥在运营期间其结构的承载能力、运营状态和耐久能力等。

1 系统目标与意义

桥梁健康监测及安全评价系统综合了现代传感技术、网络通讯技术、信号处理与分析、数据管理方法、计算机视觉、知识挖掘、预测技术、结构分析理论和决策理论等多个领域的知识,极大地延拓了桥梁检测领域的内涵,提高了预测评估的可靠性。

桥梁结构健康监测与安全评价系统,总的目标是通过测量反映大桥环境激励和结构响应状态的某些信息,实时监测大桥的工作性能和评价大桥的工作条件,以保证大桥的安全运营,并为大桥的养护维修提供科学依据。与传统的桥梁检测方法(包括众多的无损检测技术)不同,桥梁结构健康监测与安全评价系统,重在诊断可能发生结构损伤或灾难的条件和环境因素,评估结构性能退化的征兆和趋势,以便及时采取养护维修措施。而传统的检测方法,重在损伤发生后检查损伤的存在,并采取维修加固的手段。因此,桥梁结构健康监测与安全评价系统的概念具

有革命性的变革。

桥梁结构健康监测与安全评价系统,主要功能包括:(1)确认桥梁的实际性能,确保达到设计目标;(2)增加对桥梁结构安全程度的把握,确保大桥能长期安全使用;(3)服务于大桥的施工监测、成桥静动载试验和运营阶段的养护综合管理系统,减少非重点部位的人工检查次数,在意外发生期间和事后评估安全度,辅助和改进大桥的检测方法,为大桥的维护决策提供依据;(4)发展先进的大跨桥梁的监测、控制和评估技术和方法。

当然,实时健康监测系统虽可为桥梁评估提供即时客观的依据,但由于资源、成本等方面的限制,就目前情况而言,传感器系统不可能涵盖大桥的所有构件。此外,由于现阶段对大型桥梁在复杂环境下的响应的认识与经验的限制,也会导致对某些关键性部位监测不足。因此,结合当前的发展水平,我们特别强调先进的健康监测系统与传统的检查方法是大桥管理维护中相辅相成的两个方面。在大桥投入使用初期,维修工作较少,重点将放在利用实时健康监测系统和传统检查方法所得的结果,建立起精确可靠的预测模式,为制定长期稳定的检查维护计划作准备。我们建议采用的大桥维护管理策略如图1所示,它综合了传统的人工检查方法与实时健康监测系统的长处。

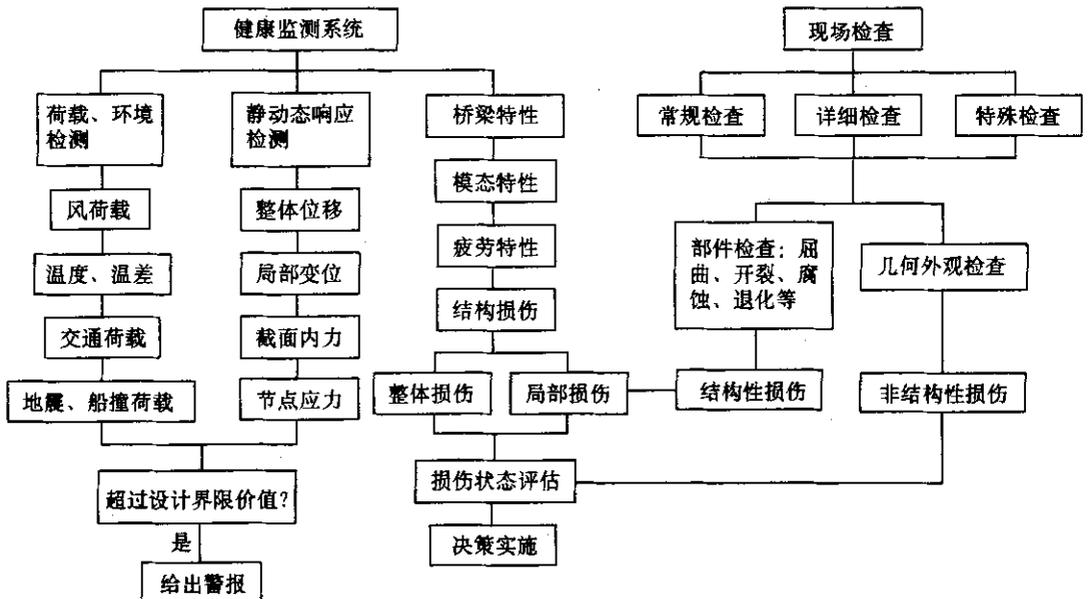


图1 大桥维护管理策略

2 桥梁结构健康监测技术在国内外的应用

随着现代传感技术、计算机与通讯技术、信号分

析与处理技术及结构振动分析理论的迅速发展,大型桥梁结构健康监测与安全评价技术,近年来已成

为国内外工程界和学术界关注的热点。

从目前理论研究状况来看:近年来,结构健康监测领域涌现了大量的研究论文,这些论文的研究内容包括智能传感器、传感器的优化布置、数据的无线传输、损伤识别方法、桥梁状态评估、桥梁生命周期管理养护等。此外,还举办了以结构健康监测为主题的国际会议,如:国际健康监测研讨会、欧洲健康监测研讨会、新型结构健康监测研讨会和智能结构和健康监测会议。另外,国际模态会议、SPIE年会、欧洲智能结构和材料会议、国际结构控制会议等都有结构健康监测和损伤识别的专题。

此外,很多研究者正致力于研究并制定桥梁健康监测系统的设计指南和规范,如:Lauzon等研究者提出了一个桥梁监测系统设计建议;美国Dexrel大学的Aktan教授等制定了比较详细的健康监测系统的设计指南;加拿大ISIS组织的主席Mufti教授也主持起草了一份结构健康监测指南。英国的研究者制定了一个指导健康监测系统设计指南。受国际结构健康监测工作委员会委托,香港理工大学以高赞明教授为首的课题组也正致力于研究制定专门用于大跨索桥监测系统的设计指南。

从实际应用来看,通过对传感器的革新和自动远程监控技术的更新换代,桥梁结构健康监测与安全评价系统正向简单易装、经济可行、持久可靠的方向发展,并已在或将在包括江阴大桥、南京二桥、南京三桥、润扬大桥和苏通大桥在内的世界许多大桥中得到应用。从目前监测系统规模和技术水平来看,香港新机场干线上的青马大桥(悬索桥)、汲水门大桥(斜拉桥)和汀九大桥(斜拉桥)装备了目前世界上技术最先进、规模最大的实时监测系统。

从发展趋势来看,桥梁结构健康监测与安全评价系统已开始成为大桥建设工程的一部分,香港目前正在兴建的昂船洲大桥和深圳西部通道大桥结构健康监测系统均与主体工程一同招标。包含1271个各类传感器的昂船洲大桥结构健康监测系统,建成后,将会是世界上最具有规模的大桥实时监测系统。可以预计,桥梁结构健康监测与安全评价系统将在桥梁管理中发挥越来越大的作用,一个桥梁数字化时代正在来临。

上述理论研究和实践应用成果,虽已极大地推动了结构健康监测与安全评价技术的发展,但随着监测技术的不断发展和完善以及在实际工程中的应用实践,亦发现尚存在较多急需解决的问题:(1)缺

乏同一标准,系统规模差异性过大;(2)传感器选型与布置合理性有待商榷;(3)健康监测系统本身的使用寿命难以得到保证;(4)环境影响及测量噪声难以消除,降低了监测数据的可靠性;(5)测量数据的不完整性,带来分析困难;(6)海量数据处理困难,淹没真实信息;(7)结构健康状况评价尚不完备;(8)相关系统的有机结合尚待加强。

因此,我们有必要加强研究,更进一步优化监测技术、完善健康监测及安全评价理论。结合苏通大桥本身特点,在现有技术水平的的基础上,设计出一套切合苏通大桥管理维护要求的功能全面、性能优良、稳定耐久、经济合理的结构健康监测与安全评价系统。

3 桥梁结构健康监测系统的构成

大跨桥梁结构健康监测与安全评价系统,主要将包括以下4个子系统,如图2所示。

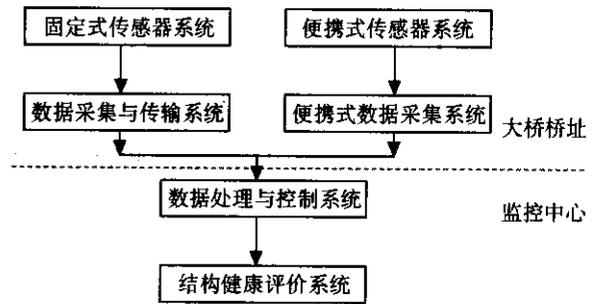


图2 大跨桥梁结构健康监测与安全评价系统框架

- 传感器系统(SS);
- 数据采集与传输系统(DATS);
- 数据处理与控制系统(DPCS);
- 结构健康状况评价系统(SHES)。

这4个子系统将运行于4个层次:第1层次是数据采集单元采集传感器系统拾取的信号;第2层次是将采集到的信号转换成数字信号并通过光纤网络输送到数据处理与控制系统;第3层次是由计算机系统完成数据的后处理、归档、显示及存储;第4层次是由高性能计算机系统完成大桥结构健康状况的评价工作,提供大桥在整个运营过程中工作状态的实时报告,并且对非正常状态提供预警,实时评估大桥的安全性、适用性,以及为大桥的定期检查和维修提供直接依据,并提交监测和结构健康评价报告。万一某一层次的硬件出现故障,其他层次的硬件将继续正常运行;同时,当某一独立部件出现故障时,其他部件的运作不受影响。

4 应用实例

江苏省交通科学研究所,近年来积极致力于大跨桥梁结构健康监测及安全评价系统的研究与应用,与香港理工大学组成的联合体相继承承担了世界第一大跨斜拉桥——苏通大桥的结构健康监测及安全评价系统的设计和研发项目,及世界第4大跨悬索桥——江阴长江公路大桥的上部结构健康监测系统升级改造。

4.1 苏通大桥结构健康监测及安全评价系统

苏通大桥结构健康监测及安全评价系统,设计将以技术先进、经济合理、可靠适用、确保质量为目的,充分考虑苏通大桥健康监测和安全评价系统中的3大类参数:(1)荷载源(输入参数),包括风、温度、交通量和地震荷载等;(2)系统特性(系统参数),包括静力效应系数和总体动力特性等;(3)桥梁的响应(输出参数),包括几何外形(或桥梁位移)、索力、

应力/应变分布、结构腐蚀和疲劳估计等。同时,苏通大桥结构健康监测及安全评价系统,还将并入苏通大桥苏通地基基础安全监控系统的一部分传感器并考虑结构的腐蚀监测。

为达到上述目的,苏通大桥结构健康监测及安全评价系统中传感器子系统(SS)将由16类传感器组成,分别是:超声风速仪,温度传感器,相对湿度传感器,车速车轴仪,全球定位系统,倾斜仪,位移传感器,加速度传感器,腐蚀监测单元,焊接式电阻应变计,振弦式应变计,光纤传感器,磁感应测力仪,土压力计,冲刷传感器,潮位传感器。包括如图3所示的由788个各类传感器所构成上部结构固定式传感器系统,由16只高精度加速度传感器构成的便携式传感器系统及包含636只传感器的基础监测传感器系统,传感器总数达到1440只。

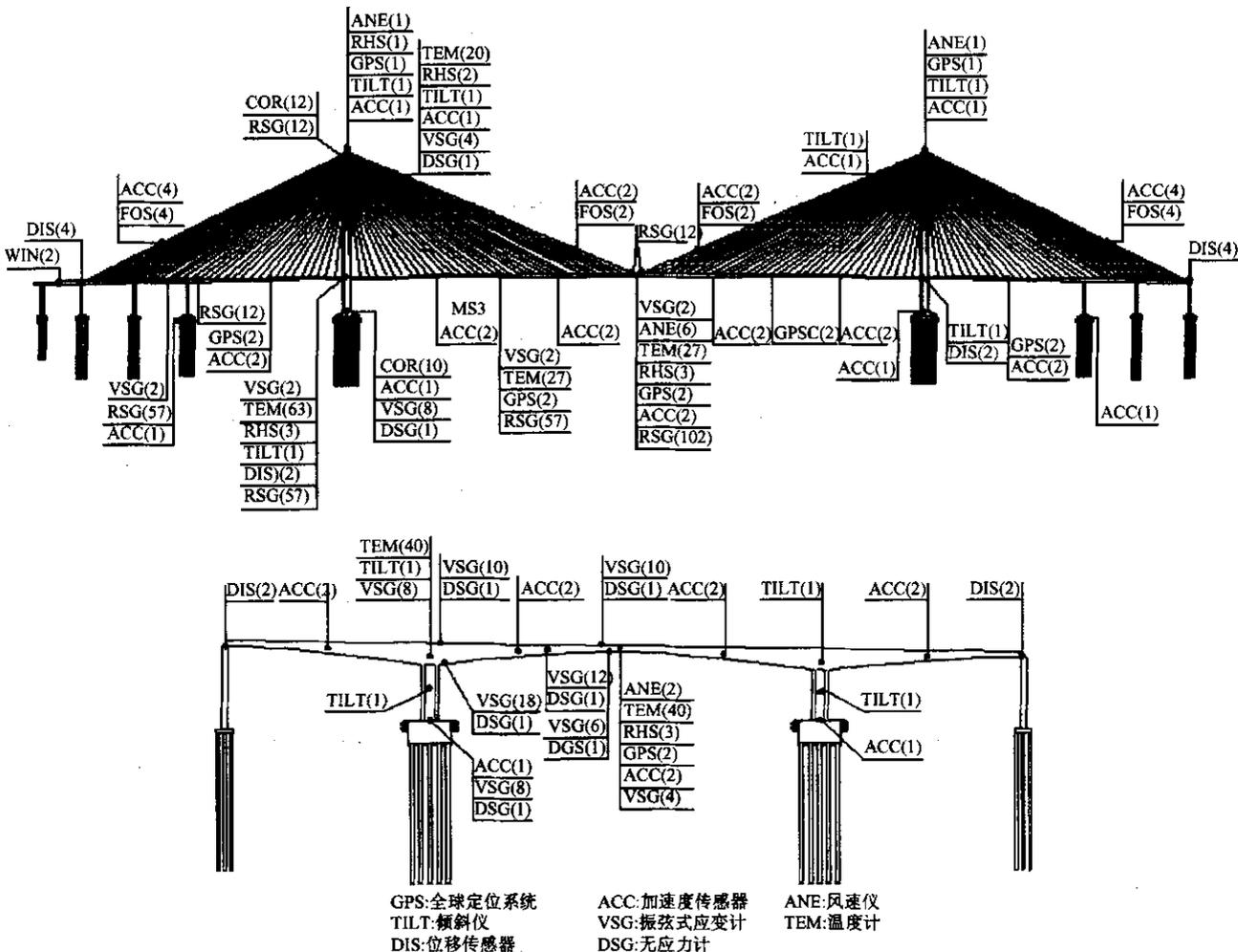


图3 苏通大桥传感器测点布置方案

4.2 江阴大桥上部结构健康监测系統升級改造工程

江阴大桥上部结构健康监测系統升級改造工程的內容包括系統的設計、設備的提供、運輸、安裝、調

試、開通、試運行、提供資料、交付使用、缺陷責任期維護、提供備件等工作項目，提供一個高可靠性的系統。其改造後的系統拓撲結構圖如圖 4 所示。

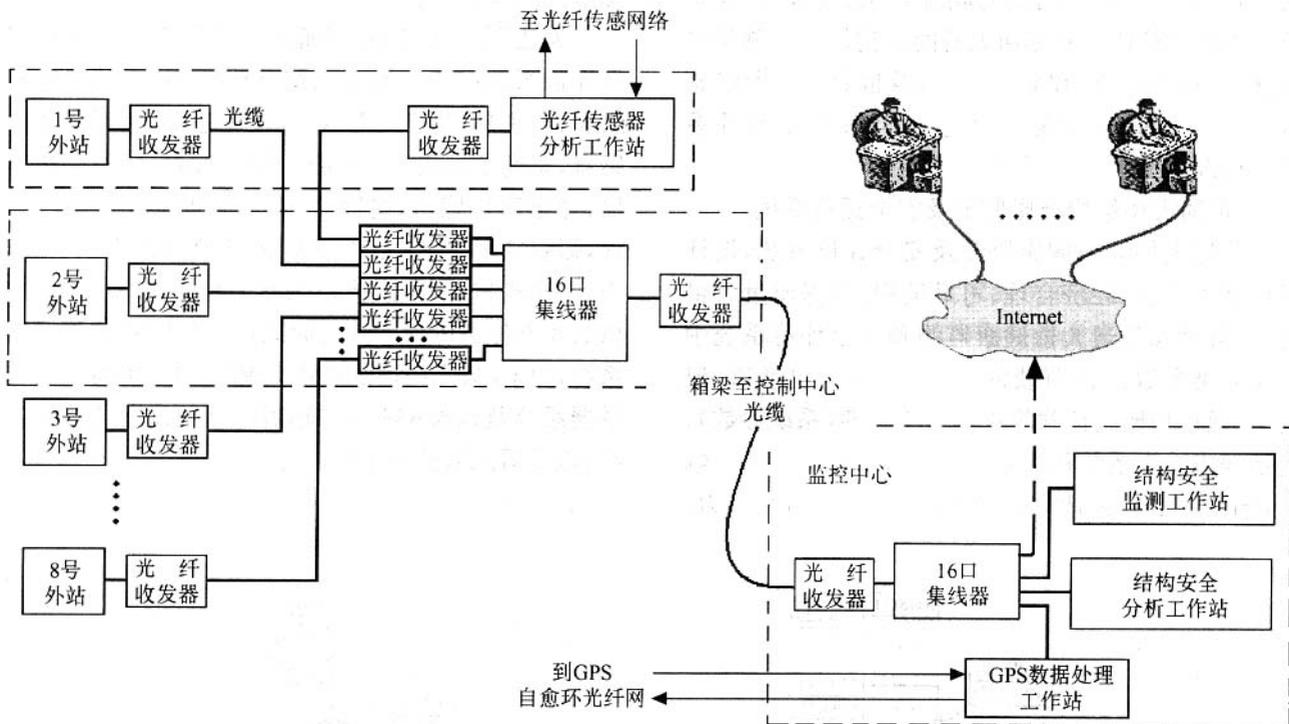


圖 4 江阴大桥上部结构健康监测系統升級改造工程系統網絡拓撲結構

5 結語

大跨橋梁結構複雜，大量應用新材料、新技術，其結構健康監測與安全評價系統，必須根據大橋的結構特點、地理環境及系統目標，結合國內外的最新研究成果和經驗，對監測系統組成、結構、數據採集、傳輸、處理、歸檔及結構狀況評估體系等，進行總體技術設計與研究，確保系統技術先進，能真正為橋梁健康評估和養護維修發揮重要作用。憑借以往在橋梁健康監測系統設計與實施中積累的豐富經驗以及強大的科研開發能力，江蘇省交通科學研究院與香港理工大學所組成的聯合體，將力爭“蘇通大橋結構健康監測及安全評估系統”和改造後的“江阴長江公路大橋上部結構健康監測系統”在硬件配置、軟件設計、系統集成及系統功能等方面達到國際先進水平，

實現該系統的預期目標。

參考文獻：

[1] Ko J M, Ni Y Q, Chan T H T. Dynamic monitoring of structural health in cable — supported bridges. Smart Structures and Materials: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, SPIE Vol. 3671, 1999.

[2] Ni Y Q, Jiang S F, Ko J M. Application of adaptive probabilistic neural network to damage detection of Tsing Ma Suspension Bridge. Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems, S. B. Chase and A. E. Aktan (eds.), SPIE Vol. 4337, 2001.

[3] 張啟偉, 等. 大型橋梁健康監測概念與監測系統設計 [J]. 同濟大學學報, 29, (1).